

# 贵州新民铝土矿矿床 Li 的地球化学特征与富集机制探究\*

龙珍<sup>1,2</sup>, 付勇<sup>1,2\*\*</sup>, 何伟<sup>3\*\*</sup>, 唐波<sup>1,2</sup>, 龙克树<sup>4</sup>, 刘阳<sup>1,2</sup>, 王天顺<sup>1,2</sup>

(1 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3 西南能矿集团股份有限公司, 贵州 贵阳 550003; 4 贵州地矿集团有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要** 新民铝土矿床位于黔北务川-正安-道真地区(简称务正道地区)大塘向斜东翼, 铝土矿(岩)型 Li 资源丰富。含矿岩系大竹园组( $P_1d$ )不同岩性的  $w(\text{Li})$  有差别: 土状-半土状铝土矿平均  $w(\text{Li})$  为  $16.34 \times 10^{-6}$ , 致密块状铝土矿平均  $w(\text{Li})$  是  $803.84 \times 10^{-6}$ , 铝土岩平均  $w(\text{Li})$  是  $1436.22 \times 10^{-6}$ , 黏土岩的平均  $w(\text{Li})$  是  $786.62 \times 10^{-6}$ , 梁山组泥岩的平均  $w(\text{Li})$  是  $51.82 \times 10^{-6}$ , 韩家店群泥岩(页岩)的平均  $w(\text{Li})$  是  $48.52 \times 10^{-6}$ , 黄龙组灰岩的平均  $w(\text{Li})$  是  $11.99 \times 10^{-6}$ 。由此可知, 研究区铝土矿(岩)型 Li 资源主要富集在含矿岩系中上部的致密块状铝土矿、铝土岩和黏土岩中, 顶板、底板以及土状-半土状铝土矿  $w(\text{Li})$  较低。Li 主要赋存于高岭石中, 伊利石(水云母)和残存的三水铝石、勃姆石也可富集少量 Li, 当样品中赋锂矿物(高岭石、伊利石(水云母)、三水铝石和勃姆石)都存在时, 高  $w(\text{Li})$ , 主量元素  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{K}_2\text{O})$ 、 $w(\text{TiO}_2)$  和  $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$  与  $w(\text{Li})$  的相关性也证实了上述结果。研究区的地球化学比值  $\text{CIA}$ 、 $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 、 $w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni})$  和  $w(\text{La})/w(\text{Y})$  综合显示, 炎热潮湿的古气候下, 有机质腐烂形成酸性环境, 半封闭海湾环境下, 黏土化阶段中等强烈的化学风化程度和适宜的风化暴露剥蚀时间利于铝硅酸盐矿物和硅酸盐矿物化学键断裂, 富集  $\text{Al}^{3+}$  形成高岭石; 风化程度过于强烈和长时间的风化剥蚀, 继续脱 Si 富 Al 形成以硬水铝石为主的铝土矿; 弱酸性-弱碱性以及氧化-还原过渡条件下, 使得高岭石能最大程度的吸附 Li 元素。

**关键词** 地质学; 铝土矿(岩)型 Li 资源; 高岭石; 影响因素; 富集机制; 新民

中图分类号: P618.45

文献标志码: A

## Geochemical characteristics and enrichment mechanism of Li in Xinmin bauxite deposit, Guizhou

LONG Zhen<sup>1,2</sup>, FU Yong<sup>1,2\*\*</sup>, HE Wei<sup>3</sup>, TANG Bo<sup>1,2</sup>, LONG KeShu<sup>4</sup>, LIU Yang<sup>1,2</sup> and WANG TianShun<sup>1,2</sup>

(1 College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2 Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025, Guizhou, China; 3 Southwest Energy Group Co. LTD, Guiyang 550003, Guizhou, China; 4 Guizhou Geology and Mining Group Co. LTD, Guiyang 550081, Guizhou, China)

### Abstract

Xinmin bauxite deposit is located in the eastern wing of the Datang syncline in Wuchuan-Zheng'an-Dozheng area (also called Wuzhengdao for abbreviation) in northern Guizhou, and there are abundant bauxite (stone) type Li resources. The  $w(\text{Li})$  of different lithologies of ore-bearing strata Dazhuyuan Formation ( $P_1d$ ) are slightly

\* 本文得到国家重点研发计划“锂能源金属矿产基底深部探测技术示范”(编号:2017YFC0602700)项目“扬子成矿省新类型锂矿成矿机制和靶区优选”(编号:2017YFC0602701)专题、中国地质调查局中国矿产地质调查项目(编号:DD20160346、DD20190379)和贵州省人才基地项目(编号:RCJD2018-21)联合资助

第一作者简介 龙珍,女,1996年生,硕士研究生,地球化学专业。Email:zolong77@126.com

\*\* 通讯作者 付勇,男,1980年生,副教授,主要从事矿床学、地球化学相关工作。Email:byez1225@126.com

何伟,男,1988年生,工程师,主要从事矿物加工工程相关工作。Email:wodedaxuehp@126.com

收稿日期 2021-03-28;改回日期 2021-07-11。秦思婷编辑。

different: the average  $w(\text{Li})$  of earth-semi-earthly bauxite is  $16.34 \times 10^{-6}$ , the average  $w(\text{Li})$  of compact massive bauxite is  $803.84 \times 10^{-6}$ , the average  $w(\text{Li})$  of bauxite stone is  $1436.22 \times 10^{-6}$  and that of clay stone is  $786.62 \times 10^{-6}$ , the average  $w(\text{Li})$  of mudstone in Liangshan Formation is  $51.82 \times 10^{-6}$ , the average  $w(\text{Li})$  of mudstone (shale) in Hanjiadian Group is  $48.52 \times 10^{-6}$ , the average  $w(\text{Li})$  of Huanglong Formation limestone is  $11.99 \times 10^{-6}$ . It can be concluded that the bauxite (stone) type Li resources in the study area are mainly enriched in compact massive bauxite, bauxite stone and clay stone in the middle and upper part of the ore-bearing strata, and the Li content of foot wall, hanging wall and earth-semi-earthly bauxite is low. In mineral assemblages, Li mainly enriched in kaolinite, illite (hydromica), residual gibbsite and boehmite also host small amounts of Li. Li content is high when those Li-bearing minerals (kaolinite, illite/hydromica, gibbsite and boehmite) are all in the sample, and the correlation between the major elements  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ ,  $w(\text{SiO}_2)$ ,  $w(\text{MgO})$ ,  $w(\text{K}_2\text{O})$ ,  $w(\text{TiO}_2)$  and  $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$  and  $w(\text{Li})$  also confirms this result. The geochemical ratios of CIA,  $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ ,  $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ ,  $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ ,  $w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni})$  and  $w(\text{La})/w(\text{Y})$  in the study area show that in the hot and humid paleoclimate, the organic matter decays to form an acidic environment. In the semi-closed bay environment, the moderate strong chemical weathering degree and suitable weathering exposure and erosion time in the clayification stage are beneficial to the chemical bond breaking of aluminosilicate minerals and silicate minerals, and the enrichment of  $\text{Al}^{3+}$  to form kaolinite; after strong and long time weathering & erosion, Si was continually removed but Al enriched to form bauxite dominated by diaspore. In a weak acid-weak alkaline and oxidation-reduction transition conditions, kaolinite can adsorb Li to the maximum extent.

**Key Words:** geology, bauxite (stone) type Li resources, kaolinite, influencing factors, enrichment mechanism, Xinmin

Li是最轻的碱金属元素,被称为“21世纪绿色高能金属”(王秋舒等,2019)。随着新能源产业的日益增长和可控核聚变研发技术不断提高,中国Li矿产资源的需求高速增长(刘丽君等,2017;2019;王登红等,2018)。国内的伟晶岩型(约70%)和盐湖型(30%)锂矿因地理位置苛刻(高海拔)、交通条件差和开采技术尚未成熟等因素,形成中国锂矿对外依存高达85%的局面(王登红等,2013;2018;于泓等,2019;王秋舒等,2019;温汉捷等,2020)。新型黏土沉积型锂矿比重较小,正处于研究阶段,尚未开发利用,寻找新型锂矿资源已成为当务之急。

近年来,研究铝土矿中“三稀”资源逐渐成为热点,结果显示,晋中、豫西、渝南和黔北等地的沉积型铝土矿伴生丰富的“三稀”资源,富集Li、Sc、Ga、V、Ti和REE等元素(王登红等,2013;赵晓东等,2013;邓国仕等,2014;王涛等,2014;温静静等,2016;负孟超等,2017;龙克树等,2019;金中国等,2019;王新彦等,2020;Ling et al., 2020)。钟海仁等(2019)收集并整理了全国典型铝土矿集区铝土矿含矿岩系的Li含量,通过对比发现各个矿集区的Li在含矿岩系的富集规律大致相同,即铝土岩>黏土岩>铝土矿,且黔北务川-正安-道真地区(简称务-正-道地区)铝土岩的平均 $w(\text{Li})$ 高达 $1111.73 \times 10^{-6}$ ,黏土岩的 $w(\text{Li})$ 为

$662.01 \times 10^{-6}$ ,主要集中在新民、瓦厂坪和大竹园等铝土矿床(金中国等,2019)。新民铝土矿床位于黔北务川-正安-道真地区,前人对研究区的工作主要集中在古气候(余文超等,2014;Yu et al., 2018)、沉积环境(崔滔,2013a;金中国等,2018)、矿床地质特征(隗含涛,2013)和地球化学特征等方向(代龙省,2015;韩英等,2015;鲍森等,2020),以及Li的分布规律、机理等方面的探讨(金中国等,2015;钟海仁等,2019;温汉捷等,2020)。本文重点开展了Li在铝土矿(岩)中迁移和富集与矿物组合特征、古气候和沉积环境之间的相关性研究,为今后同类型Li资源研究具有重要借鉴意义。

## 1 地质概况

研究区位于黔北务川-正安-道真地区北部(图1a),大地构造位置位于扬子准地台南缘黔北台隆遵义断拱凤岗北北东向构造变形区,受燕山期华夏系构造的影响,区内构造成NE向和NNE向展布,是黔中-川南成矿带的重要组成部分(刘平,1987;武国辉等,2006;代龙省,2015)。区域内出露的地层由古到新主要是寒武系、奥陶系、中-下志留统、石炭系、二叠系、三叠系等,第四系零星分布(莫光员等,2013;汪小妹等,2013),无火成岩和变质岩出露。构造主

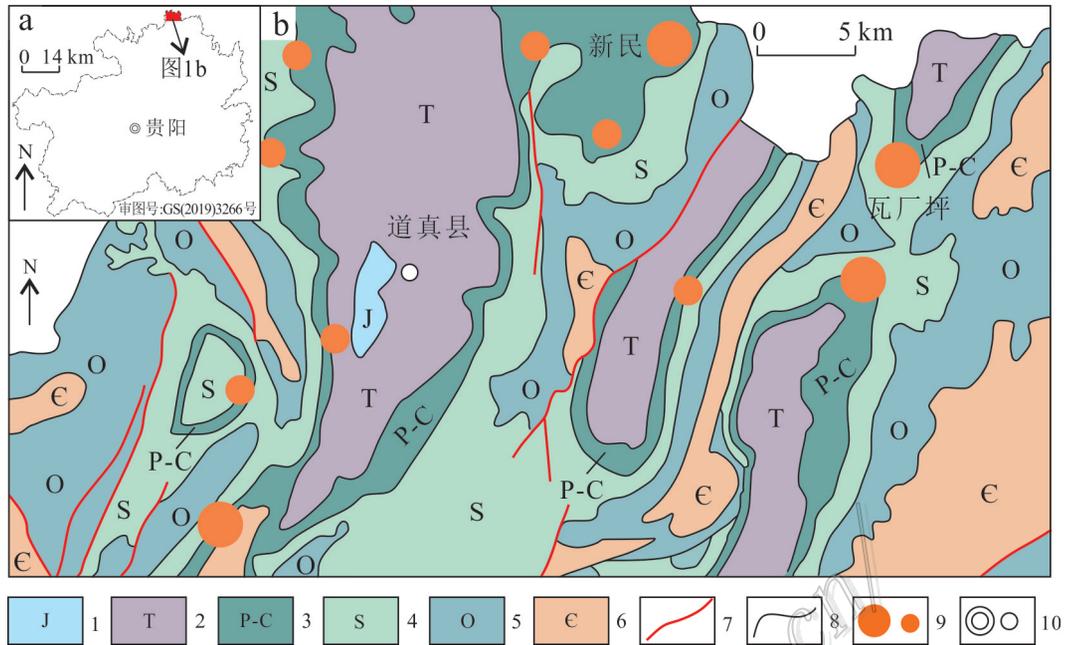


图1 研究区位置图(a)和黔北务正道区域地质图(b, 据金中国等, 2013; 龙克树等, 2019)

1—侏罗系;2—三叠系;3—石炭系—二叠系;4—志留系;5—奥陶系;6—寒武系;7—断层;8—地质界线;9—铝土矿床;10—市、县

Fig. 1 Location of the study area (a) and regional geologic map of Wuzhengdao region in northern Guizhou (b, after Jin et al., 2013; Long et al., 2019)

1—Jurassic; 2—Triassic; 3—Carboniferous—Permian; 4—Silurian; 5—Ordovician; 6—Cambrian; 7—Fault; 8—Geological boundary; 9—Bauxite deposit; 10—County and town

要是断层和褶皱,其中褶皱主要是大塘向斜、道真向斜、鹿池向斜和桃园向斜等,以及复式向斜和复式背斜组合出现,形成典型的背斜狭长、向斜宽缓的“隔槽式”褶皱;断层主要是分布在背斜核部和向斜两翼,成NE向展布(图1b)(金中国等,2013)。

黔北务正道地区铝土矿赋矿地层为下二叠统大竹园组,铝土矿成矿期间成矿环境在不断发生变化:海平面上升期(间冰期),与扬子海湾连通,形成一个半封闭的海湾(图2a);海平面下降(冰期),由于障壁岛的阻碍,形成一个局限、滞留的台地相。研究区位于古纬度 $8.2^{\circ}$ ,赤道附近,南北纬 $30^{\circ}$ 之间,年平均气温为 $33.4\sim 40.1^{\circ}\text{C}$ (刘巽锋等,1990),低纬度炎热潮湿的热带亚热带气候,雨量充足,植被发育,在这些利于铝土矿形成的成矿条件下,来自中-下志留统韩家店群泥岩(页岩)(主要)和上石炭统黄龙组碳酸盐岩(次要)的成矿物质(余文超,2017),在有机质参与形成的酸性环境下,硅酸盐矿物进行红土化和表生淋滤等一系列成岩成矿作用,形成黏土矿物和铝矿物(刘巽锋等,1990;廖士范等,1991;杜远生等,2015;邓旭升等,2020)。

矿区出露的地层有志留系、石炭系、二叠系和三叠系(图2b),缺失泥盆系,发育中-下志留统韩家店群灰色、灰白色的泥岩(页岩),偶夹少量泥质顺层碎屑,上石炭统黄龙组浅灰色和灰白色中-粗晶灰岩,中二叠统梁山组的黑色和灰黑色碳质泥岩,局部劣质煤以及中二叠统栖霞+茅口组灰岩和下三叠统(金中国等,2013;龙克树等,2019)。含矿岩系是下二叠统大竹园组,与上覆地层中二叠统梁山组整合接触,与下伏地层中-下志留统韩家店群泥岩(页岩)或下石炭统黄龙组灰岩不整合接触(金中国等,2013;莫光员等,2013;汪小妹等,2013)。含矿岩系岩性以土状-半土状铝土矿、致密块状铝土矿、铝土岩和黏土岩等为主(图3)。

## 2 样品采集及分析测试

选取新民铝土矿床沿走向(ZKX1114、ZKX056、ZKX1526)和倾向(ZKX11118、ZKX1111、ZKX1114)排列的5个钻孔,共计59件代表性样品进行主量元素和微量元素测试分析,结果见表1。全岩样品的主量元素是在北京科荟测试技术有限公司用波长色散

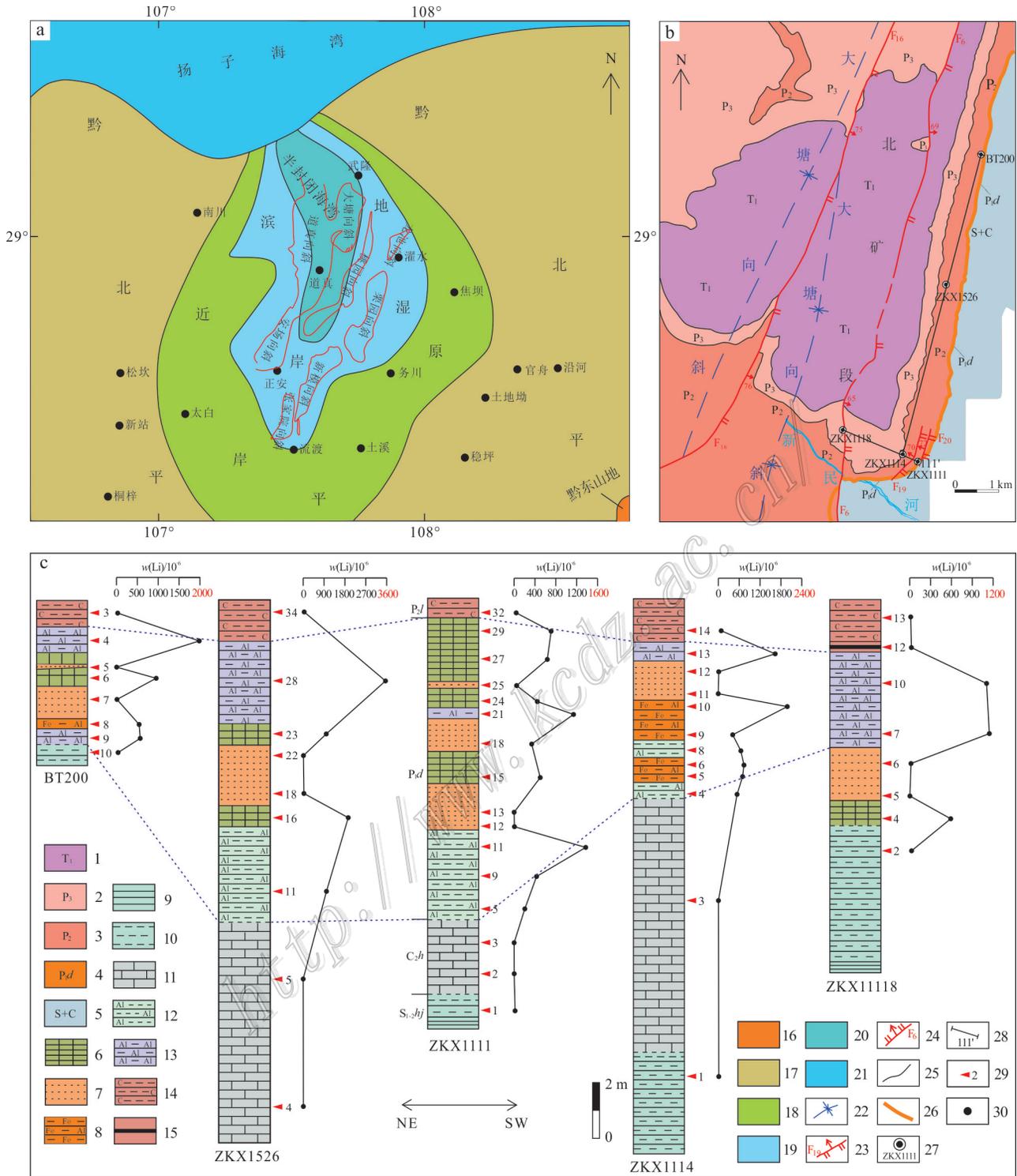


图2 黔北务正道地区早二叠世古地理示意图(a, 据杜远生等, 2014)、新民主铝土矿床地质图(b, 据龙克树等, 2019; 严爽, 2020)和新民主铝土矿床钻孔Li含量变化示意图(c)

1—下三叠统; 2—上二叠统; 3—中二叠统; 4—下二叠统大竹园组; 5—石炭系—志留系; 6—致密状块状铝土矿; 7—土状—半土状铝土矿; 8—含铝(铁)质黏土岩; 9—页岩; 10—泥岩; 11—灰岩; 12—黏土岩; 13—铝土岩; 14—碳质泥岩; 15—煤线; 16—黔东南山地; 17—黔北平原; 18—近岸平原; 19—滨岸湿地; 20—半封闭海湾; 21—扬子海湾; 22—向斜; 23—正断层及编号; 24—逆断层及编号; 25—地质界线; 26—含铝岩系露头; 27—钻孔位置及编号; 28—勘探线及编号; 29—取样位置; 30—地名

Fig. 2 Early Permian paleogeographic map of Wuzhengdao region in northern Guizhou (a, after Du et al., 2014), geologic map of

Xinmin bauxite deposit (b, after Long et al.,2019; Yan, 2020 ) and stratigraphic column with diagram of Li content change in Xinmin bauxite deposit (c)

1—Lower Triassic; 2—Upper Permian; 3—Middle Permian; 4—Lower Permian Dazhuyuan Formation; 5—Carboniferous—Silurian; 6—Compact massive bauxite; 7—Earth-semi-earthly bauxite; 8—Aluminum (iron) bearing claystone; 9—Shale; 10—Mudstone; 11—Limestone; 12—Claystone; 13—Bauxitite; 14—Carbonaceous mudstone; 15—Coal seams; 16—East Guizhou Mountains; 17—North Guizhou Plain; 18—Nearshore plain; 19—Coastal wetlands; 20—Semi-enclosed bay; 21—Yangtze Bay; 22—Syncline; 23—Normal fault and number; 24—Reverse fault and number; 25—Geological boundaries; 26—Aluminiferous strata outcrop; 27—Drill hole location and number; 28—Exploration line and number; 29—Sample location; 30—Town name



图3 新民铝土矿岩矿结构构造图

a. 土状-半土状铝土矿(ZKX1526-22); b. 致密块状铝土矿(ZKX1111-18); c. 铝土岩(ZKX1114-5); d. 黏土岩(ZKX1114-8); e. 泥质结构(ZKX1111-24, 单偏光); f. 豆粒结构(ZKX1526-22, 单偏光)

Fig. 3 Photos showing the structure & texture of bauxites from Xinmin bauxite deposit

a. Earth-semi-earthly bauxite (ZKX1526-22); b. Compact massive bauxite (ZKX1111-18); c. Bauxite stone (ZKX1114-5); d. Clay stone (ZKX1114-8); e. Pelitic texture (ZKX1111-24, plane-polarized light); f. Pisolitic texture (ZKX1526-22, plane-polarized light)

X射线荧光光谱仪(XRF-1800)和AUW120D等仪器测试,微量元素和稀土元素在国家地质实验测试中心完成,经封闭压力酸溶,用NexION300Q型电感耦合等离子体发射质谱仪(ICP-MS)对样品进行测试分析,精度优于5%。选取13件代表性样品,用北达智汇微构分析测试中心有限公司的X射线衍射仪(D/max-rB)(XRD)对矿物的物相进行定性和定量分析。

### 3 矿物组合

用偏光显微镜、矿相显微镜和XRD分析,研究区含矿岩系矿物组合主要由铝矿物(硬水铝石)以及黏土矿物(高岭石)组成,次要矿物有勃姆石、三水铝石、绿泥石和云母等,含少量的铁矿物、重矿物和其

表1 新民铝土矿主要元素和微量元素含量及特征参数  
Table 1 Contents and characteristic parameters of major elements and trace elements in Xinmin bauxite deposit

样品编号	岩性	w(B)/%										w(B)/10 <sup>-6</sup>					CIA	CaO/MgO	Sr/Ba	Sr/Cu	V/Ni
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CaO	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Li	V	Ni	Cu	Sr	Ba	A/S					
ZKX1111-1	黑色泥岩	17.57	63.04	2.91	0.15	4.29	0.74	0.36	6.34	55.28	139.25	53.80	26.06	235.97	465.53	0.28	79.29	0.12	0.51	9.05	2.59
ZKX1111-2	中至粗晶灰岩	2.49	3.99	0.66	0	0.59	0.10	50.23	0.94	8.60	25.04	38.29	23.86	843.66	1248.23	0.62	80.84	76.11	0.68	35.36	0.65
ZKX1111-3	泥晶灰岩	1.83	2.16	0.54	0	0.22	0.07	52.12	1.52	10.44	33.08	41.88	3.29	829.76	38.03	0.85	89.27	96.52	21.82	252.43	0.79
ZKX1111-5	含铝铁质黏土岩	25.26	25.76	4.52	0.05	1.00	0.73	0.32	32.96	201.01	477.62	434.36	51.95	332.36	136.42	0.98	95.83	0.07	2.44	6.40	1.10
ZKX1111-9	含铝黏土岩	37.81	44.55	0.33	1.37	1.14	1.94	0.14	0.89	456.43	295.32	321.47	70.77	274.43	257.58	0.85	91.85	0.42	1.07	3.88	0.92
ZKX1111-11	含铝黏土岩	38.78	42.49	0.47	0.06	1.91	1.92	0.16	1.31	1384.03	420.25	240.84	28.03	396.79	556.80	0.91	99.82	0.34	0.71	14.16	1.74
ZKX1111-12	土状铝土矿	75.94	1.35	0.10	0.04	0.02	6.92	0.10	0.51	4.37	539.20	15.92	25.74	25.89	20.62	56.25	99.87	1.00	1.26	1.01	33.87
ZKX1111-13	土状铝土矿	77.39	1.23	0.10	1.29	0.02	5.39	0.10	0.66	7.57	545.47	12.22	42.75	19.31	5.86	62.92	93.64	1.00	3.30	0.45	44.64
ZKX1111-15	致密块状铝土矿	74.64	7.50	0.32	0.10	0.47	1.48	0.09	0.50	551.78	274.05	19.60	16.57	33.09	47.42	9.95	99.11	0.28	0.70	2.00	13.98
ZKX1111-18	致密块状铝土矿	75.37	6.96	0.18	0.12	0.76	1.38	0.11	0.47	355.53	288.59	22.44	18.12	38.12	79.87	10.83	98.69	0.61	0.48	2.10	12.86
ZKX1111-21	黑色铝土岩	30.01	29.22	3.10	0.19	0.74	0.76	0.20	2.74	1127.89	454.16	83.38	80.70	250.99	202.39	1.03	96.40	0.06	1.24	3.11	5.45
ZKX1111-24	致密块状铝土矿	54.89	25.98	0.25	0.17	0.16	3.14	0.13	0.67	458.74	440.16	75.71	16.43	136.27	44.67	2.11	99.17	0.52	3.05	8.29	5.81
ZKX1111-25	土状铝土矿	77.54	1.70	0.13	0.04	0.05	4.04	0.10	0.82	69.68	458.79	17.83	42.70	12.83	8.34	45.61	99.83	0.77	1.54	0.30	25.73
ZKX1111-27	致密块状铝土矿	71.08	10.76	0.26	0.11	1.17	1.43	0.10	0.52	632.10	352.83	23.26	52.39	108.23	108.12	6.61	98.10	0.38	1.00	2.07	15.17
ZKX1111-29	致密块状铝土矿	67.14	11.81	2.20	0.02	0.12	1.38	0.31	1.99	701.18	350.64	50.12	92.14	307.28	47.37	5.69	99.76	0.14	6.49	3.33	7.00
ZKX1111-32	碳质泥岩	21.63	44.34	2.73	0.18	5.02	0.94	5.21	6.98	53.22	259.81	53.89	17.98	772.18	504.30	0.49	80.08	1.91	1.53	42.94	4.82
ZKX1114-1	泥岩	18.05	61.52	3.02	0.22	4.45	0.79	0.23	6.89	62.47	153.23	66.15	40.90	245.04	508.66	0.29	78.68	0.08	0.48	5.99	2.32
ZKX1114-3	中晶灰岩	0.82	0.69	0.34	0	0.02	0.04	55.26	0.37	21.45	7.94	43.15	1.53	488.56	17.28	1.19	97.62	162.53	28.27	319.55	0.18
ZKX1114-4	含铁铝质黏土岩	32.32	35.05	2.53	0.39	1.92	1.55	0.13	15.71	858.36	276.69	145.49	17.24	668.78	357.13	0.92	92.98	0.05	1.87	38.79	1.90
ZKX1114-5	铁质铝土岩	35.92	25.69	3.08	0.34	0.48	2.17	0.12	21.18	987.97	204.32	95.78	10.59	303.28	149.87	1.40	97.45	0.04	2.02	28.64	2.13
ZKX1114-6	铁质铝土岩	34.82	34.94	2.16	0.64	2.41	1.64	0.14	13.11	1081.68	265.30	143.93	43.42	832.51	466.80	1.00	91.61	0.06	1.78	19.17	1.84
ZKX1114-8	含铝质黏土岩	34.19	37.39	0.85	0.32	0.33	4.17	0.14	8.75	929.35	328.31	113.83	33.16	252.26	186.62	0.91	97.74	0.16	1.35	7.61	2.88
ZKX1114-9	含铁铝土岩	41.75	32.25	0.27	0.62	0.72	2.36	0.10	6.02	727.39	203.90	102.42	34.25	162.08	169.17	1.29	96.67	0.37	0.96	4.73	1.99
ZKX1114-10	含铁铝土岩	48.95	28.84	0.88	0.66	1.51	3.89	0.13	2.18	2016.48	266.37	41.50	17.44	303.01	546.45	1.70	95.51	0.15	0.55	17.37	6.42
ZKX1114-11	土状铝土矿	73.34	1.84	0.13	0.06	0.06	7.85	0.37	1.95	4.54	381.69	8.36	17.61	25.96	12.34	39.86	99.76	2.85	2.10	1.47	45.65
ZKX1114-12	土状铝土矿	68.18	2.55	0.12	0.05	0.17	7.70	0.29	3.97	1.68	860.70	51.73	39.59	55.13	28.41	26.74	99.61	2.42	1.94	1.39	16.64
ZKX1114-13	铝土岩	40.60	35.55	1.38	0.80	1.29	3.23	0.13	3.46	1628.47	587.21	15.62	18.24	295.34	542.55	1.14	94.82	0.09	0.54	16.19	37.59
ZKX1114-14	碳质泥岩	26.67	39.23	1.69	0.48	6.56	1.09	1.05	9.01	103.59	291.33	51.94	17.41	681.92	788.11	0.68	78.01	0.62	0.87	39.16	5.61
ZKX1114-16	灰岩夹碳质泥岩	4.34	13.78	1.28	0	1.10	0.20	43.02	1.73	8.17	45.54	40.53	5.85	1105.65	103.38	0.31	79.78	33.61	10.70	189.14	1.12
ZKX1118-2	泥岩	16.68	61.93	2.78	0.96	3.69	0.72	0.87	7.11	52.30	117.50	50.76	33.23	245.61	394.23	0.27	75.14	0.31	0.62	7.39	2.31

续表 1  
Continued Table 1

样品编号	岩性	w(B)/%										w(B)/10 <sup>-6</sup>										A/S	CIA	CaO/MgO	Sr/Ba	Sr/Cu	V/Ni
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CaO	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Li	V	Ni	Cu	Sr	Ba												
ZKX11118-4	致密状铝土矿	42.24	22.46	1.28	0.11	0.11	2.27	0.24	14.46	597.28	321.88	192.86	28.33	86.05	58.82	1.88	99.22	0.19	1.46	3.04	1.67						
ZKX11118-5	土状铝土矿	74.68	3.55	0.18	0.09	0.17	4.92	0.11	1.70	14.74	687.48	28.42	27.77	33.51	143.44	21.04	99.53	0.61	0.23	1.21	24.19						
ZKX11118-6	土状铝土矿	75.29	2.87	0.15	0.12	0.17	4.62	0.09	1.71	39.86	637.38	36.24	41.46	31.24	19.17	26.23	99.50	0.60	1.63	0.75	17.59						
ZKX11118-7	铝土岩	41.56	40.27	0.73	0.82	0.95	1.11	0.09	1.34	1153.64	599.33	112.78	18.76	276.86	245.46	1.03	95.72	0.12	1.13	14.76	5.31						
ZKX11118-10	铝土岩	45.47	29.38	2.77	0.37	0.49	4.57	0.12	2.76	1030.27	156.33	9.82	19.03	135.82	173.48	1.55	97.89	0.04	0.78	7.14	15.92						
ZKX11118-12	劣质煤	24.88	42.79	2.43	0.50	5.44	1.12	0.46	7.35	88.36	292.51	48.56	16.75	726.17	618.61	0.58	79.54	0.19	1.17	43.36	6.02						
ZKX11118-13	碳质泥岩	10.54	22.81	1.38	0.08	2.64	0.49	30.75	3.70	27.85	115.79	40.79	7.74	1507.09	372.17	0.46	79.01	22.28	4.05	194.72	2.84						
BT200-10	泥岩	17.14	62.08	2.63	0.56	4.06	0.73	0.44	7.34	38.50	127.02	51.66	16.80	102.28	451.07	0.28	76.79	0.17	0.23	6.09	2.46						
BT200-9	铝质泥岩	33.31	35.44	1.33	0.72	3.79	1.25	0.40	10.19	586.97	582.75	174.33	83.88	1655.34	1086.36	0.94	87.15	0.30	1.52	19.73	3.34						
BT200-8	含铁铝土岩	35.09	26.19	0.34	0.24	1.69	2.99	0.26	19.83	526.83	294.65	26.09	43.68	271.36	455.69	1.34	94.18	0.76	0.60	6.21	11.29						
BT200-7	土状铝土矿	78.97	1.05	0.10	0.04	0.03	4.90	0.08	1.01	5.34	518.80	0.76	14.56	15.03	8.67	75.21	99.86	0.80	1.73	1.03	681.87						
BT200-6	致密状铝土矿	63.81	16.08	1.25	0.20	1.29	1.20	0.28	1.88	937.76	277.61	24.28	15.83	82.91	322.49	3.97	97.42	0.22	0.26	5.24	11.44						
BT200-5	土状铝土矿	80.67	0.87	0.09	0	0.02	2.60	0.17	0.57	3.55	381.45	0.81	18.83	456.94	115.47	92.72	99.98	1.89	3.96	24.27	468.81						
BT200-4	铝土岩	48.47	32.25	0.97	0.76	1.78	1.80	0.28	1.26	1996.47	321.81	7.54	14.54	192.83	584.01	1.50	94.50	0.29	0.33	13.26	42.65						
BT200-3	碳质泥岩	27.01	44.28	1.78	0.20	6.05	1.23	0.38	5.19	65.91	327.24	20.69	13.95	322.05	549.42	0.61	80.72	0.21	0.59	23.08	15.82						
BT200-2	褐红色页岩	25.60	45.02	2.21	0.20	6.28	1.24	0.57	6.31	45.28	289.78	14.83	27.61	237.25	530.42	0.57	79.31	0.26	0.45	8.59	19.53						
BT200-1	泥晶灰岩	0.80	1.67	0.88	0	0.15	0.03	53.90	0.34	4.02	9.11	41.00	3.04	471.96	20.83	0.48	84.21	61.25	22.66	155.33	0.22						
ZKX1526-1	泥岩	17.73	62.33	2.90	0.23	4.42	0.75	0.36	6.29	44.61	143.90	46.38	32.91	195.75	482.73	0.28	78.42	0.12	0.41	5.95	3.10						
ZKX1526-2	泥岩	14.28	64.31	2.35	0.33	3.39	0.73	3.21	5.07	37.99	100.47	37.15	15.84	182.20	400.90	0.22	77.91	1.37	0.45	11.50	2.70						
ZKX1526-3	灰岩	5.21	17.14	0.93	0	1.36	0.22	39.62	2.43	14.95	50.71	26.35	72.72	517.13	158.75	0.30	79.30	42.60	3.26	7.11	1.92						
ZKX1526-4	灰岩	1.49	13.37	0.98	0	0.30	0.06	45.06	1.02	6.80	13.90	18.35	19.88	427.52	193.13	0.11	83.24	45.98	2.21	21.51	0.76						
ZKX1526-5	灰岩	3.99	5.57	0.55	0	0.99	0.11	48.61	1.26	9.70	38.78	23.23	5.58	319.12	120.32	0.72	80.12	88.38	2.65	57.17	1.67						
ZKX1526-11	含铝质黏土岩	36.20	39.62	0.87	1.47	1.50	1.60	0.20	5.35	1090.17	316.07	179.86	49.93	559.48	594.76	0.91	91.95	0.23	0.94	11.21	1.76						
ZKX1526-16	块状铝土矿	58.69	20.16	1.14	0.38	1.24	1.99	0.23	1.71	1994.23	343.49	31.70	12.24	274.09	300.25	2.91	96.94	0.20	0.91	22.40	10.84						
ZKX1526-18	土状铝土矿	78.05	3.79	0.10	0.09	0.48	2.82	0.11	0.54	25.66	459.67	9.08	13.04	53.97	35.35	20.59	99.16	1.10	1.53	4.14	50.62						
ZKX1526-22	半土状铝土矿	79.86	0.91	0.09	0.05	0.02	3.61	0.12	0.63	2.75	499.33	14.02	8.55	42.14	6.19	87.76	99.85	1.33	6.81	4.93	35.60						
ZKX1526-23	致密块状铝土矿	62.15	14.44	0.64	0.33	1.14	2.10	0.25	3.08	1006.00	304.18	33.07	18.21	126.50	295.75	4.30	97.31	0.39	0.43	6.95	9.20						
ZKX1526-28	含角砾铝土岩	44.15	35.24	1.81	0.85	1.35	1.06	0.17	2.01	3521.36	303.09	33.32	10.92	365.32	483.71	1.25	94.91	0.09	0.76	33.45	9.10						
ZKX1526-34	碳质泥岩	26.81	41.60	2.30	0.38	6.32	1.19	0.37	7.27	70.01	369.75	53.45	13.13	619.15	664.23	0.64	79.13	0.16	0.93	47.15	6.92						

注:微量元素数据据龙克树等,2019;龙克树,2020;严爽,2020;A/S=w(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/w(SiO<sub>2</sub>),CIA=1000×w(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O),CaO\*代表硅酸盐中的CaO的摩尔分数,若w(CaO)≤w(Na<sub>2</sub>O),CaO\*=w(CaO),若w(CaO)>w(Na<sub>2</sub>O),CaO\*=w(Na<sub>2</sub>O)(Bock,1998;杜远生等,2015)。比值单位为1。

他矿物,龙克树等(2019)发现磷铝铈矿。顶板(梁山组)和底板(韩家店群和黄龙组)以云母、石英和方解石等矿物为主(表2)。综合宏观和微观鉴定特征,研究区含矿岩系的结构构造有土状结构、泥质结构、豆(鲕)粒结构和块状构造等(图3)。

## 4 分析及讨论

### 4.1 Li的分布规律

本文以铝土矿中Li<sub>2</sub>O综合利用品位为基础(叶霖等,2007),将研究区的平均w(Li)分为高(≥1000×10<sup>-6</sup>)、中(300~1000×10<sup>-6</sup>)和低(≤300×10<sup>-6</sup>)3个等级。

本次采取的样品先野外初步定名,结合主量元素和微量元素分析(表1),参照刘巽锋等(1990)对黔北务-正-道地区铝土矿的分类标准,含矿岩系采样38件,分为铝土矿(w(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)≥40%,A/S>1.8)、铝土岩(w(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)>w(SiO<sub>2</sub>),A/S=1~1.8)和黏土岩(w(SiO<sub>2</sub>)>w(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),A/S<1)3类。其中,铝土矿20件,包括土状-半土状铝土矿11件和致密块状铝土矿有9件;铝土岩和黏土岩分别是11件和7件。含矿岩系中下部主要是铁质黏土岩、黏土岩、土状-半土状铝土矿

和少量的铝土岩和致密块状铝土矿,中上部以铝土岩和致密块状铝土矿,夹少量土状-半土状铝土矿。其中,土状-半土状铝土矿的w(Li)为1.68×10<sup>-6</sup>~69.68×10<sup>-6</sup>(平均16.34×10<sup>-6</sup>)、致密块状铝土矿的w(Li)为355.53×10<sup>-6</sup>~1994.23×10<sup>-6</sup>(平均803.84×10<sup>-6</sup>)、铝土岩的w(Li)为526.83×10<sup>-6</sup>~3521.36×10<sup>-6</sup>(平均1436.22×10<sup>-6</sup>)和黏土岩w(Li)为201.01×10<sup>-6</sup>~1384.03×10<sup>-6</sup>(平均786.62×10<sup>-6</sup>)、底板韩家店群的w(Li)为37.99×10<sup>-6</sup>~62.47×10<sup>-6</sup>(平均48.52×10<sup>-6</sup>)和黄龙组的w(Li)为6.80×10<sup>-6</sup>~21.45×10<sup>-6</sup>(平均11.99×10<sup>-6</sup>)以及顶板梁山组的w(Li)为4.02×10<sup>-6</sup>~103.59×10<sup>-6</sup>(平均51.82×10<sup>-6</sup>)。w(Li)总体上的变化为中上部高-中w(Li),中下部中-低w(Li)(图2c),且铝土岩>致密块状铝土矿>黏土岩>土状-半土状铝土矿(图7i)。

### 4.2 Li与矿物的关系

研究区矿物由铝矿物、黏土矿物、铁矿物、重矿物和其他矿物组成,且w(Li)变化为铝土岩>致密块状铝土矿>黏土岩>土状-半土状铝土矿,同样是铝土矿(岩),但是Li相对含量相差较大,这可能与矿物组成有关。研究区的w(Li)与矿物(岩石)组成的规律总结为矿物组合单一(铝矿物或黏土矿物只有

表2 新民铝土矿北矿段代表性岩矿样品XRD汇总及w(Li)含量表

Table 2 XRD summary and w(Li) of representative rock and ore samples in the north block of the Xinmin bauxite mine

层位	样品编号	岩性	w(B)/%													w(Li)/10 <sup>-6</sup>		
			硬水 铝石	勃姆 石	三水 铝石	高岭 石	绿泥 石	伊利 石(水 云母)	斜长 石	微斜 长石	黄铁 矿	金红 石	锐钛 矿	磷铝 铈矿	石英		方解 石	
韩家店群	ZKX1526-2	泥岩					16	21	4	4						47	8	37.99
	BT200-7*	土状铝土矿	95										2	3				5.35
	ZKX1526-22	半土状铝土矿	95													1		2.75
	BT200-6*	致密块状铝土矿	12	73		4		6				2	1	2				937.76
	ZKX1114-5*	铁质铝土岩	39				26	35										987.97
大竹园组	ZKX1114-10*	含铁铝土岩	56				15	11	18									2016.48
	ZKX1114-13	铝土岩	20	22			13	19	18			8						1628.47
	BT200-4	铝土岩	9	50	10	11	8	12										1996.47
	ZKX1111-5*	含铁铝质黏土岩						100										201.01
	BT200-9*	铝质黏土岩	21				15	34					9	11	10			586.97
	ZKX1526-28	铝土岩	24	10	15	12	23	16										3521.36
梁山组	ZKX1111-32	碳质泥岩					12	24	8	8	12					20	16	53.22

注:\*据龙克树等,2019;其余据龙克树,2020;严爽,2020。

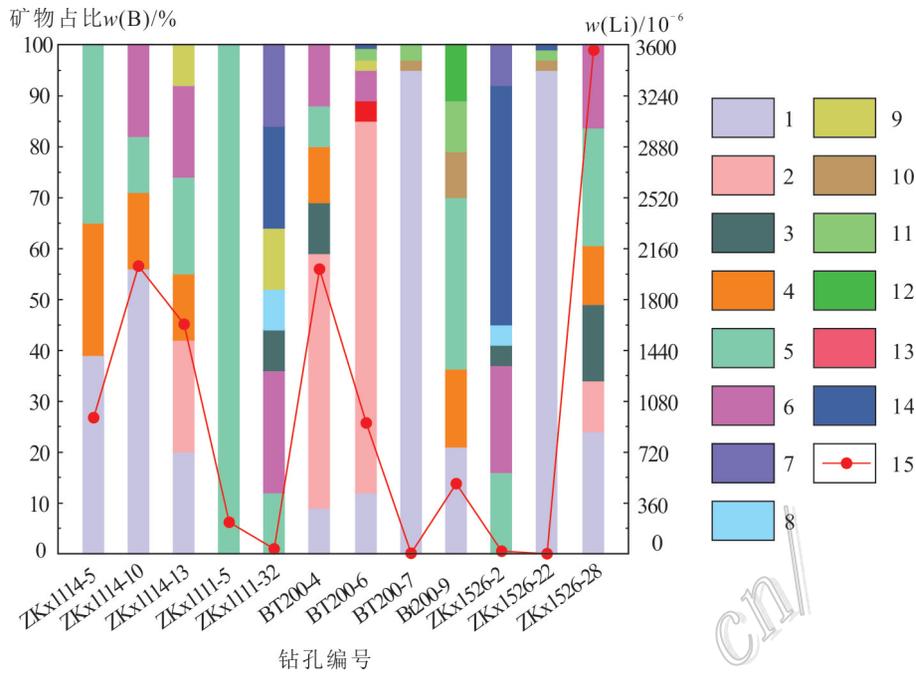


图4 新民铝土矿矿物组成与w(Li)关系图

1—硬水铝石;2—勃姆石;3—三水铝石;4—高岭石;5—绿泥石;6—伊利石(水云母);7—斜长石;8—微斜长石;9—黄铁矿;10—金红石;11—锐钛矿;12—磷铝铀矿;13—石英;14—方解石;15—w(Li)

Fig. 4 Relationship between mineral composition and w(Li) content of bauxites from Xinmin

1—Diaspore; 2—Boehmite; 3—Gibbsite; 4—Kaolinite; 5—Chlorite; 6—Illite (hydromica); 7—Plagioclase; 8—Microcline; 9—Pyrite; 10—Rutile; 11—Anatase; 12—Florencite; 13—Quartz; 14—Calcite; 15—w(Li)

一种,含铁矿物、重矿物等),低w(Li)(BT200-7、ZKX1526-22、ZKX1111-5);铝矿物和黏土矿物均含有时,中-高w(Li)(图5)。

硬水铝石在研究区分布最广,其次是勃姆石和三水铝石,图5显示的是新民铝土矿床不同矿物与w(Li)的相关性:硬水铝石、勃姆石相关性不明显,三水铝石与w(Li)呈微弱的正相关(图5a~c),三水铝石是红土化阶段的主要铝矿物,勃姆石和硬水铝石则是三水铝石在成岩过程中,由三水铝石脱水形成(廖士范等,1991;Gu et al., 2013),因此,新民铝土矿中三水铝石与w(Li)的正相关关系,反映的是红土化阶段铝土矿物与w(Li)的关系。硬水铝石与w(Li)的负相关,以及勃姆石与w(Li)的无相关性,说明由三水铝石向硬水铝石的脱水转换中,伴随着Li的流失。

研究区的黏土矿物包括伊利石(水云母)、高岭石和绿泥石,主要存在于致密块状铝土矿、铝土岩和黏土岩中,图5中,w(Li)与绿泥石呈微弱负相关(图5d),与伊利石(水云母)和高岭石正相关(图5e~f)。伊利石(水云母)在新民铝土矿中主要存在于铝土岩

中,致密状铝土矿中也有少量存在;伊利石(水云母)具有与蒙脱石相似的2:1型层状结构,当样品中存在伊利石(水云母)时,w(Li)通常较高。新民铝土矿中的高岭石在黏土岩、铝土岩及致密状铝土矿中均有存在,以黏土岩中含量最高,致密状铝土矿中最低;与伊利石(水云母)不同,高岭石为1:1型单元层结构,其阳离子吸附能力要弱于前者,当黏土矿物中同时存在伊利石(水云母)和高岭石时,Li<sup>+</sup>可能优先吸附于伊利石(水云母)中,导致高岭石与w(Li)虽然成正相关,但相关程度要弱于伊利石(水云母)。研究区的绿泥石主要存在于黏土岩与铝土岩中,以黏土岩中的含量较高;绿泥石通常形成于富Fe、Mg,且具备一定温度压力条件的碱性环境,在地表红土化阶段,绿泥石难以形成,铝土矿中的绿泥石应是伊利石(水云母)或高岭石在成岩作用下转变而成(沈丽璞等,1986;刘羽,1987;崔滔,2013),锂绿泥石则可由高岭石和Li<sup>+</sup>在一定的条件下形成(Zhao et al., 2018);新民铝土矿中绿泥石与锂含量的无相关性,不仅说明绿泥石不是新民铝土矿锂的主要赋存矿

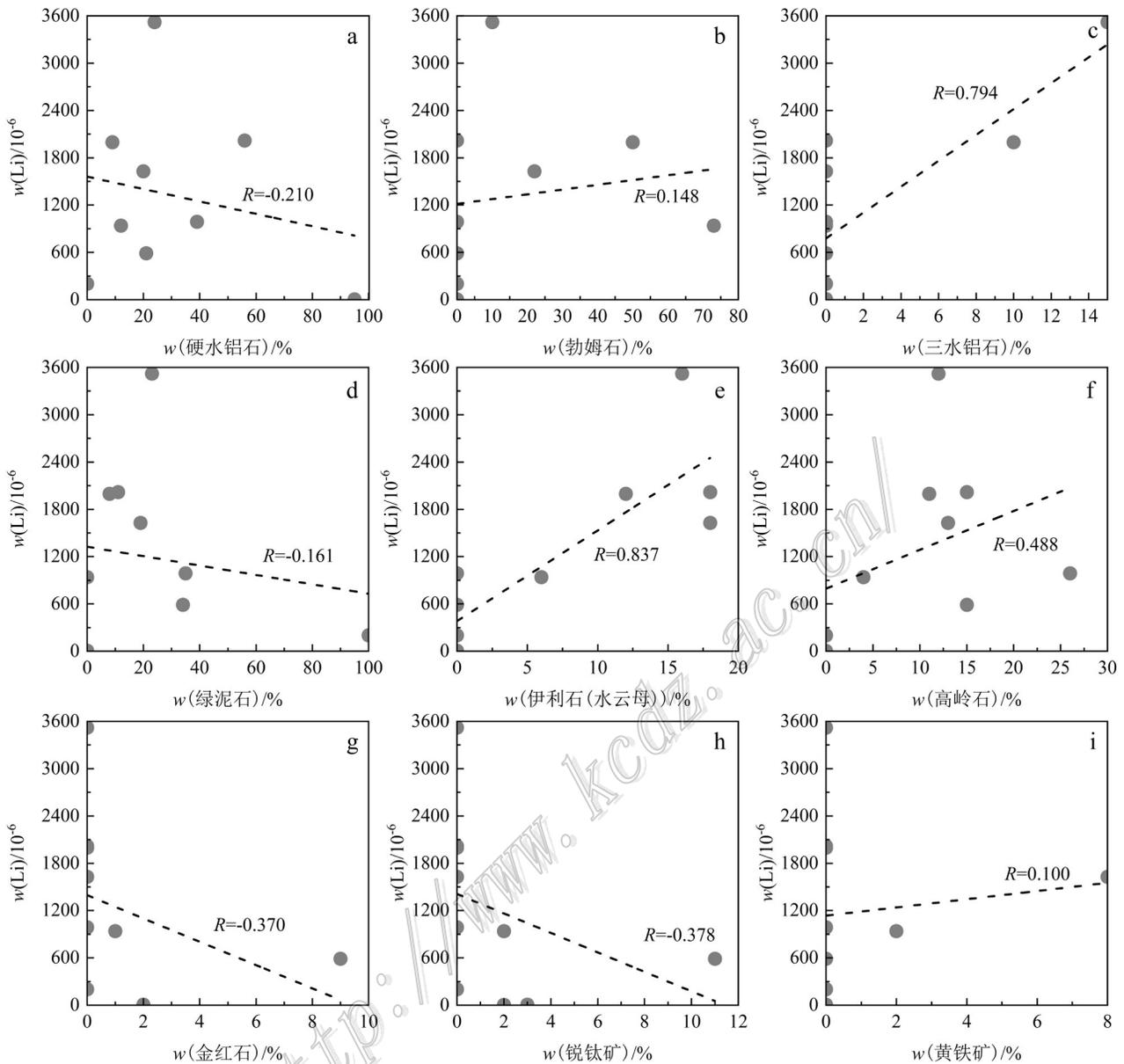


图5 新民铝土矿床矿物含量与w(Li)的相关性图解

Fig. 5 Graph of correlation between mineral and  $w(\text{Li})$  content in Xinmin bauxite deposit

物,也间接否定了含铝岩系中锂绿泥石的存在。综上所述,伊利石(水云母)和高岭石均是新民铝土矿中Li的主要赋存矿物,虽然伊利石(水云母)对Li的吸附能力相对较强,但由于高岭石的分布相对更广,因此,新民铝土矿中的锂大部分应赋存于高岭石中,但样品中伊利石(水云母)的存在对锂含量贡献较大。

研究区的重矿物有金红石和锐钛矿,分布较广,两者与 $w(\text{Li})$ 都呈明显的负相关关系(图5g~h),说明重矿物不是Li的寄主矿物,同时,当样品有重矿物的加入,可能会降低 $w(\text{Li})$ 。类似的,黄铁矿与 $w(\text{Li})$ 没

有明显的相关性(图5i),表示黄铁矿对Li的含量无直接影响。

研究区含矿岩系的主量元素与 $w(\text{Li})$ 的相关性各有不同,本文探讨 $w(\text{Li})$ 与 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{K}_2\text{O})$ 、 $w(\text{TiO}_2)$ 和 $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 这6种主量元素的相关性,进一步证实了Li与矿物的相关性。 $w(\text{Li})$ 与 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 呈负相关(图6a),说明锂含量随铝土矿化作用增加、硬水铝石的增加而降低;与 $w(\text{TiO}_2)$ 的负相关(图6b)正好印证了 $w(\text{Li})$ 与锐钛矿、金红石的关系。与 $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 的不明显相关性(图6c),同 $w(\text{Li})$ 与

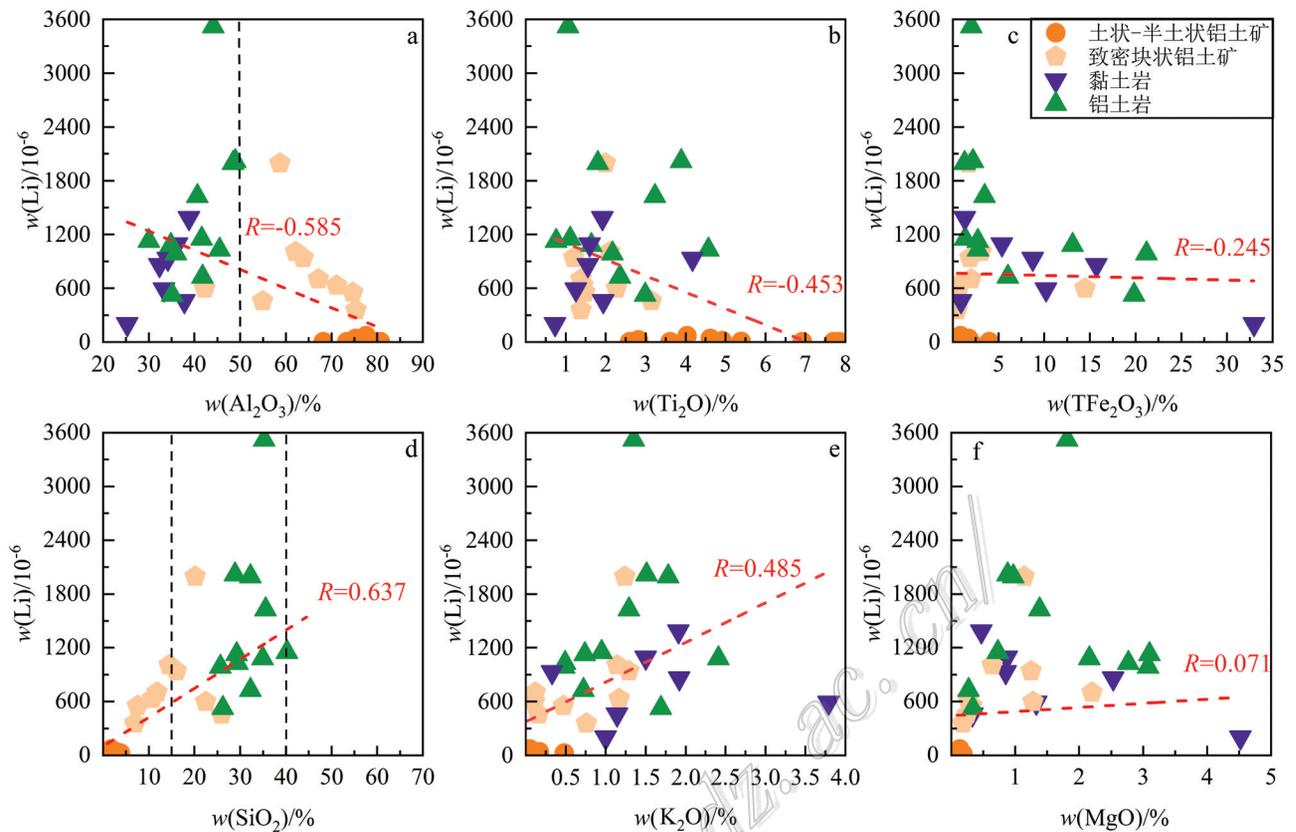


图 6 新民铝土矿主要元素与  $w(\text{Li})$  的相关性图解

Fig. 6 Graph of correlation between major elements and  $w(\text{Li})$  in Xinmin bauxite deposit

黄铁矿的相关性一致;  $w(\text{Li})$  与  $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{K}_2\text{O})$  和  $w(\text{MgO})$  成正相关(图 6d~f), 不仅说明 Li 含量随黏土矿物增加而增加, 同时也说明  $w(\text{Li})$  与含 K、Si 的黏土矿物(伊利石(水云母)、高岭石)关系较与含 Mg 的黏土矿物(绿泥石)关系更为密切。

综上所述, 新民铝土矿中的 Li 主要赋存于高岭石、伊利石(水云母)等黏土矿物中; 新民铝土矿中的 Li 大部分应赋存于高岭石中, 但样品中伊利石(水云母)的存在对  $w(\text{Li})$  贡献较大。残存的三水铝石、勃姆石中也赋存一定量的  $w(\text{Li})$ 。当样品中上述赋锂矿物都存在时, 样品高  $w(\text{Li})$ 。

化学蚀变指数(CIA)能灵敏地反映化学风化程度, 因此, 广泛应用在反演古气候环境方面(徐林刚等, 2014; 杜远生等, 2015; 崔焱等, 2018), 研究区的 CIA 在 75~99 之间, 含矿岩系介于 90~99(图 7a), 表明强烈的化学风化最利于铝土矿的形成, 且风化程度越高, 形成铝土矿的品位也越高, 化学风化程度中等的韩家店群和梁山组, CIA 在 75~80 之间, 顶板和

底板的 CIA 明显小于含矿岩系。但研究区  $w(\text{Li})$  与 CIA 的相关性变化是: 当  $\text{CIA} < 90$  时, 低 Li; 当  $\text{CIA} = 90 \sim 97$  时, CIA 与  $w(\text{Li})$  呈微弱的正相关, 高 Li; 当  $\text{CIA} > 97$  时, CIA 与  $w(\text{Li})$  呈微弱的负相关, 中-低 Li; 与崔焱等(2018)研究黔中铝土矿床(九架炉组)含矿岩系 Li 与 CIA 的相关性基本一致。因此, 风化程度过于强烈( $\text{CIA} > 97$ )时, 不利于 Li 富集。同样,  $w(\text{V})/w(\text{Ni})$  比值也可指示沉积物风化时间, 比值越大, 沉积物接受风化暴露的时间则越长, 反之则越短(刘辰生等, 2018)。研究区的  $w(\text{V})/w(\text{Ni})$  比值显示, 适宜的风化暴露时间比长时间的风化暴露剥蚀更利于 Li 富集(图 7b), 因此, 铝土矿的化学风化程度和暴露剥蚀时间是影响研究区富 Li 的条件之一。新民铝土矿经过的第一阶段——红土化(风化作用)阶段时, 实质上就是风化作用, 而化学风化在此阶段起着重要作用, 形成三水铝石、高岭石等矿物。研究区的含矿岩系, 在从含铝(铁)质黏土岩→铝土岩→致密块状铝土矿→土状-半土状铝土矿的转化过程中, 铝质含量逐渐

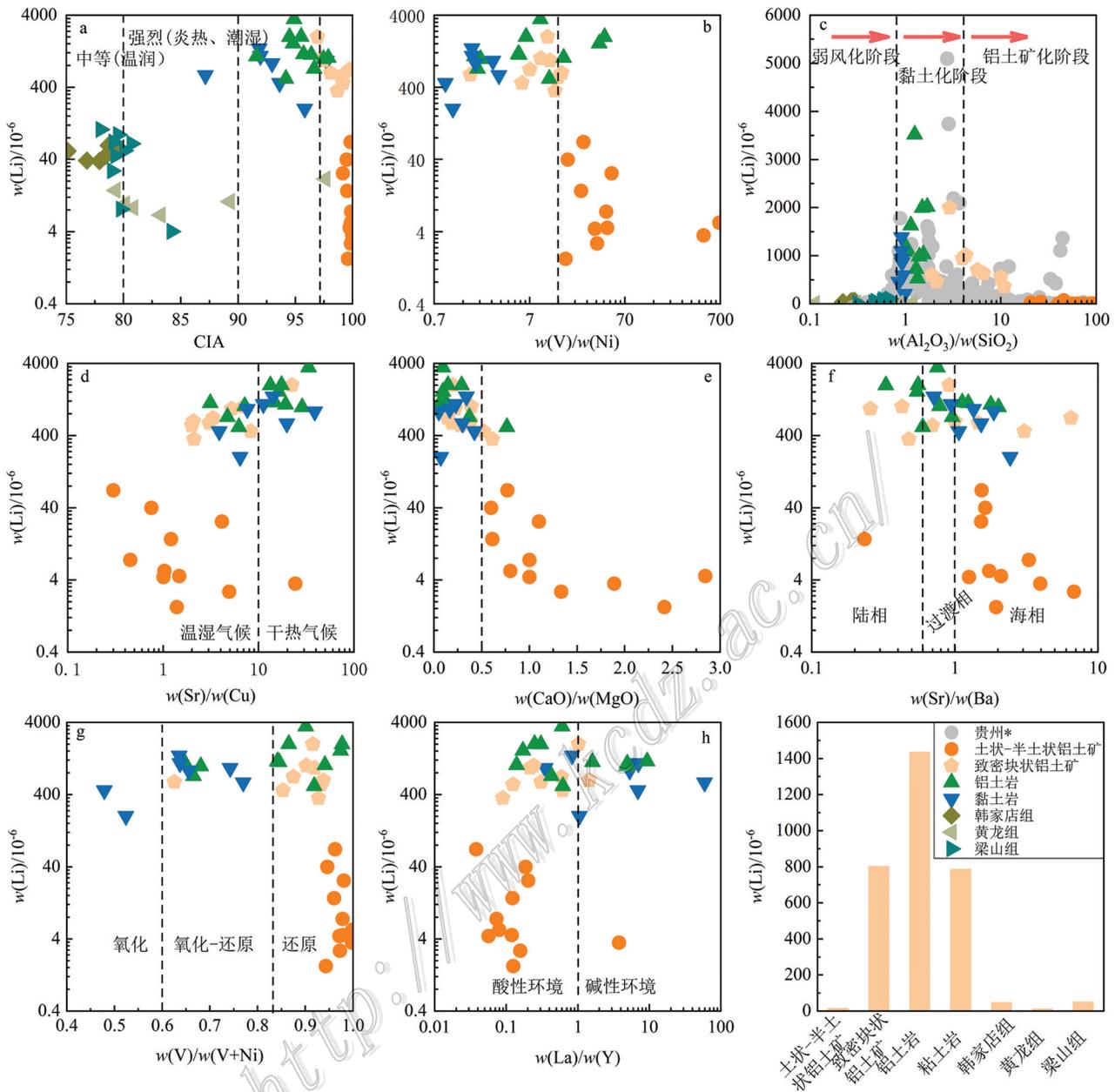


图7 新民铝土矿床微量元素比值与 $w(\text{Li})$ 的相关性图解(\*数据据廖士范等,1991;叶霖等,2008;崔滔,2013;李玉娇等,2013;隗含涛,2013;黄智龙等,2014;代龙省,2015;金中国等,2018;Ling et al.,2018;其他数据见表1)

Fig. 7 Correlation diagram of trace element ratio and Li in Xinmin bauxite deposit(\*date after Liao et al.,1991; Ye et al.,2008; Cui, 2013; Li et al.,2013; Wei,2013; Huang et al.,2014; Dai,2015; Jin et al.,2018; Ling et al.,2018; Other data are shown in Table 1)

增多,硅质相对减少,此过程中成铝物质的化学风化作用经过弱风化、黏土化和铝土矿化3个阶段,黏土化阶段比弱风化阶段和铝土矿化阶段都富Li,在黏土化阶段,先形成蒙脱石、水云母等黏土矿物,有机质参与形成酸性环境,这2种矿物易被破坏,形成稳定性更高的高岭石(刘宝珺,1980;廖士范等,1991;温汉捷等,2020)。因此,在黏土化阶段形成大量高

岭石,Li富集在高岭石中。但研究区的铝土矿在此阶段受形成时的古气候(地表温度、降雨和植被发育等)、沉积环境、酸碱度和风化时间等条件影响(Yu et al.,2018;杜远生等,2020),导致高岭石等黏土矿物不同程度的向铝矿物转变,也导致Li差异性富集在铝土矿(岩)中。

用 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{SiO}_2)$ 比值来反映研究区顶板、底

板和含矿岩系所处的风化作用阶段有明显不同(温汉捷等,2020)(图7c),韩家店群、黄龙组和梁山组均处于弱风化阶段,低Li,此时矿物组合以硅酸盐矿物、黏土矿物和碳酸盐岩矿物为主。在研究区含矿岩系中,除高品位的土状-半土状铝土矿以及部分高Al、低Si的致密块状铝土矿处于铝土矿化阶段之外,中Al、中Si的铝土岩和黏土岩均处于黏土化阶段,同样,贵州典型铝土矿床富Li的铝土矿(岩)风化程度在黏土化阶段,推测黏土化阶段形成大量的高岭石更利于Li富集。

#### 4.4 研究区沉积环境分析

不同元素对气候的灵敏度不同,元素比值法能很好的来指示沉积物的古气候的变化,如 $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 和CIA,本文用3种元素比值来综合指示研究区铝土矿的古气候。 $w(\text{Sr})/w(\text{Cu}) > 10$ 为干热气候,1~10为温湿气候环境, $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 比值越高,古温度也就越高,CIA > 80表示温湿气候,CIA < 80为干热气候(刘刚等,2007;徐兆辉等,2011;杜远生等,2015;金中国等,2018;钟海仁等,2020)。在研究区含矿岩系中,CIA、 $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ 、和 $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 值(图7a、d~e)均显示,铝土矿形成时为炎热潮湿的气候,与前人的研究相吻合。只是不同类型的铝土矿(岩)受到的气候可能会略有差别,如温湿气候主要是影响高品位的土状-半土状铝土矿、致密块状铝土矿和黏土岩,利于在表生富集阶段发生后期淋滤作用;干热气候对低Al、高Si的铝土岩和黏土岩有影响。温湿和干热气候对Li富集都有利(图7d),两者的富集方式不同,前者主要是在铝土矿成矿物质在搬运至沉积盆地时 $\text{Li}^+$ 以及其他易迁移元素随着水流一起迁移至沉积盆地内富集,当后期表生淋滤作用增强时, $\text{Li}^+$ 吸附在高岭石中,这也可能是Li在干热气候下更富集的原因之一。 $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 显示,温度过高不利于富Li,这是因为在黏土化阶段中,研究区低纬度炎热潮湿的气候环境,植被发育,腐烂后地表微生物参与形成酸性的水体环境,更利于硅酸盐矿物进行化学风化作用,化学键断裂,形成高岭石。

古盐度的识别方法多种多样,最新的研究进展中, $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 比值法的准确率为66%(Wei et al., 2019)。 $\text{Ba}^{2+}$ 和 $\text{Sr}^{2+}$ 的地球化学性质不同,在不同的沉积环境两者的含量有所差别,因此, $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 比值法能很好的区分铝土矿沉积环境和盐度。当 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba}) < 0.6$ 时,为淡水(陆相)沉积环境,当其

为0.6~1为过渡相(海陆交互相),大于1为咸水(海相)沉积环境(史忠生等,2003;王峰等,2017;Wei et al.,2019;杨季华等,2020)。在研究区的含矿岩系中, $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 比值变化较大,介于0.23~6.81,平均值1.62(图7f),表示研究区铝土矿沉积是陆相和海陆不断变化的过程:海平面上升,扬子海湾由北向南入侵,形成一个半咸水-咸水的半封闭海湾;海平面下降,形成一个低能、安静的泄湖相,直至海水退出务正道地区,因此,研究区的沉积环境是不断变化的(崔滔等,2013a;黄兴等,2013;姜在兴等,2015;金中国等,2018;崔滔,2020)。黏土化阶段形成高 $w(\text{Li})$ 的致密块状铝土矿、铝土岩,黏土岩的 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 比值介于0.43~2.02,主要以海陆过渡相为主,陆相为辅,与半封闭海湾的沉积环境吻合(图6f)。低 $w(\text{Li})$ 土状-半土状铝土矿受海相影响较大,海陆过渡相环境中,阴离子和阳离子不断交换,有陆源碎屑的加入,使得过渡相最利于Li在高岭石中富集。

V、Ni元素在不同条件下易被胶体质点或黏土等吸附沉淀,前者更易在还原条件下易被吸附,后者则是在还原环境下富集,因此, $w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni})$ 比值法可指示沉积物沉积的氧化还原条件, $w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni}) < 0.60$ 为氧化环境; $0.60 < w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni}) < 0.84$ 为氧化-还原环境(过渡环境); $w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni}) > 0.84$ 为还原环境(王峰等,2017)。研究区的铝土矿主要在氧化-还原的过渡环境和还原环境下形成(图7g),但氧化环境对Li富集影响较小,中-高 $w(\text{Li})$ 的铝土矿、铝土岩和黏土岩受氧化-还原的过渡相影响,还原环境下低 $w(\text{Li})$ 、中 $w(\text{Li})$ 和高 $w(\text{Li})$ 三个等级均包含,表示还原和氧化环境对Li富集无明显影响,对Li富集影响较大的氧化-还原的过渡相。

铝土矿中 $w(\text{La})/w(\text{Y})$ 比值的变化可以用来指示铝土矿沉积过程中pH值的变化:当 $w(\text{La})/w(\text{Y}) > 1$ 时,碱性环境;当 $w(\text{La})/w(\text{Y}) < 1$ 时,酸性环境(康微,2013)。研究区的 $w(\text{La})/w(\text{Y})$ 在0.06~59.24,多数在3以内,少数超过3,显示研究区铝土矿(岩)沉积成矿的酸碱环境不断变化(图7h),这符合铝土矿沉积成岩过程中不同风化阶段,产生不同矿物(岩石)所需要的酸碱度不同,当弱风化阶段→黏土化阶段→铝土矿化阶段,酸碱度的变化是:碱性-中性→酸性。当pH=4~8时,高岭石对Li的吸附量增加;当pH=7~8时,高岭石等对Li元素的吸附达到最大(吴雅琴等,2011;王鑫等,2018),表示过酸、过碱均不利于Li富集。

## 5 结论

新民铝土矿床的Li主富集在含矿岩系的中上部,且 $w(\text{Li})$ 的变化是铝土岩>致密块状铝土矿>黏土岩>土状-半土状铝土矿。Li主要赋存在高岭石中,伊利石(水云母)的存在对锂含量贡献较大,残存的三水铝石、勃姆石中也赋存有少量的Li。当样品中以上3种赋Li矿物(高岭石、伊利石(水云母)和三水铝石以及勃姆石)都存在时, $w(\text{Li})$ 高。

研究区的CIA显示,化学风化在铝土矿红土化阶段起着重要作用,高岭石吸附Li则是在黏土化阶段。地球化学比值 $w(\text{Sr})/w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{CaO})/w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 显示,研究区在早二叠世处于赤道附近低纬度的温热气候,雨量充沛,植被发育,有机质腐烂,形成酸性环境,半封闭海湾的海陆过渡相和陆相沉积环境下,海平面在铝土矿(岩)沉积成矿期间不断变化,铝硅酸盐矿物和硅酸盐矿物在黏土化阶段 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{K}^{+}$ 和 $\text{Mg}^{+}$ 最大程度流失,中等强烈的风化程度以及适宜的风化暴露剥蚀,形成富含高岭石铝土矿(铝土岩)。 $w(\text{La})/w(\text{Y})$ 和 $w(\text{V})/w(\text{V}+\text{Ni})$ 显示,高岭石在弱酸性-弱碱性以及弱还原条件最大程度的吸附Li,导致了Li在高岭石中的差异性富集。当风化强度和持续时间持续加大,则形成以硬水铝石等铝土矿物为主的高品位低 $w(\text{Li})$ 的土状-半土状铝土矿。

## References

- Bao M, Han J J, Zhu D S, Xie F X, Lin Q F and Liu G. 2020. Geochemical characteristics and enrichment laws of rare earth elements in different types of bauxite in Wuzhengdao area, northern Guizhou Province[J]. Mineral Exploration, 11(5):936-943(in Chinese with English abstract).
- Bock B, McLennan S M and Hanson G N. 1998. Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen Member(Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in New England[J]. Sedimentology, 45(4): 635-655.
- Cui T. 2013. Analysis on metallogenic environment of bauxite in northern Guizhou (Master's thesis)[D]. Tutor: Jiao Y Q. Wuhai: China University of Geosciences. 1-107(in Chinese with English abstract).
- Cui T, Jiao Y Q, Du Y S, Wang X M, Lei Z Y and Weng S F. 2013a. Mineralogical and geochemical characteristics of bauxite in northern Guizhou[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 23(10):2905-2920(in Chinese with English abstract).
- Cui T, Jiao Y Q, Du Y S, Yu W C, Ji B, Lei Z Y, Weng S F, Jin Z G and He X L. 2013b. Analysis on paleosalinity of sedimentary environment of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province[J]. Geological Science and Technology Information, 32(1):46-51(in Chinese with English abstract).
- Cui Y, Luo C G, Xu L, Zhang H, Deng M G, Gu H N, Meng Y, Qing C Y and Wen H J. 2018. Weathering origin and enrichment of lithium in clay rocks of the Jiujiayu Formation, Central Guizhou Province, southwest China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 37(4):696-704(in Chinese with English abstract).
- Cui T. 2020. Key control factor in ore-forming process of bauxite in northern Guizhou-Sea level changes[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 30(6):1466-1479(in Chinese with English abstract).
- Dai L S. 2015. Geological and geochemical characteristics research on Xinmin bauxite deposit in Daozhen County, Guizhou Province, China(Master's Thesis)[D]. Tutor: Jin Z G and Zhang R X. Kunming: Kunming University of Science and Technology. 1-64(in Chinese with English abstract).
- Deng G S, Li J M, Yang G H, Zhao X D, Chen L, Chen Y and Lü T. 2014. Distribution law of lithium and its influencing factors in Shuijiangbanqiao bauxite mining area, southern Chongqing[J]. China Mining Magazine, 23(3):72-79(in Chinese with English abstract).
- Deng X S, Du Y S, Yu W C, Wu K B, Lu S F and Zhang H B. 2020. 'Qianzhong Uplift' and evolution of the Late Paleozoic palaeogeography and its control on Formation of bauxite in Guizhou Province[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 22(5): 872-892(in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Zhou Q, Jin Z G, Ling W L, Wang X M, Yu W C, Cui T, Lei Z Y, Weng S F, Wu B, Tan Y J, Cao J Z, Peng X H, Zhang Z and Deng H. 2014. Mineralization model for the Early Permian bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an - Daozhen area, northern Guizhou Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Zhou Q, Jin Z G, Jiao Y Q, et al. 2015. Sedimentary geology of Permian bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 4-160(in Chinese).
- Du Y S and Yu W C. 2020. Subaerial leaching process of sedimentary bauxite and the discussion on classifications of bauxite deposits[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(5): 812-826(in Chinese with English abstract).
- Gu J, Huang Z L, Fan H P, Jin Z G, Yan Z F and Zhang J W. 2013. Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 130:44-59.
- Guizhou Provincial Geological Survey Institute. 2017. Regional geology of Guizhou Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 93-1024(in Chinese).

- Han Y, Zou L, Wang J B, Zhu X Y, Jin Z G, Lu X X and Guo J. 2016. Geochemical characteristics of bauxite in the Wuzhengdao area, Guizhou Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 35(44): 653-662 + 691(in Chinese with English abstract).
- Huang X, Zhang X H, Du Y S, Qie W K, Yang B and Duan X F. 2013. Control of Sea-level changes over the forming of bauxite between Carboniferous and Permian in northern Guizhou and adjacent regions[J]. Geological Science and Technology Information, 32(1): 80-86(in Chinese with English abstract).
- Huang Z L, Jin Z G, Xiang X L, Gu J, Wu G H, Chen X L, Su Z L, Zhao Y Y, Ye L and Zou L. 2014. Metallogenic theory and prediction of bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province, China[M]. Beijing: Science Press. 21-189(in Chinese).
- Jiang Z X. 2003. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. 1-528(in Chinese).
- Jin G Z, Huang Z L, Liu L, Chen X L and Bao M. 2013. Study on the metallogenic regularity of bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 7-127(in Chinese).
- Jin Z G, Zhou J X and Huang Z L. 2015. The distribution of associated elements Li, Sc and Ga in the typical bauxite deposits over the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite ore district, northern Guizhou Province[J]. Geology in China, 42(6):1910-1918(in Chinese with English abstract).
- Jin Z G, Li C S, Zou L, Zheng M H, Zhang L and Han Y. 2018. Geochemical evidence of sedimentary environment of Permian bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou Province[J]. Acta Geologica Sinica, 92(4): 817-827(in Chinese with English abstract).
- Jin Z G, Liu L, Huang Z L, Liu C S, Zheng M H, Gu J, Zou L and Wang L. 2019. Occurrence state, enrichment mechanism and resource potential of rare earth, rare metal and rare-scattered elements in ore-bearing rocks in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite deposit, Guizhou Province[J]. Acta Geologica Sinica, 93(11): 2847-2861(in Chinese with English abstract).
- Kang W. 2013. Geological characteristics and Metallogenic environment of Baofeng bauxite field in Henan Province (Master's Thesis) [D]. Tutor: Wang Q F. Beijing: China University of Geosciences. 34-60(in Chinese).
- Liao S F and Liang T R. 1991. Chinese bauxite geology[M]. Guizhou: Guizhou Science and Technology Press. 1-250(in Chinese).
- Ling K Y, Tang H S, Zhang Z W and Wen H J. 2020. Host minerals of Li-Ga-V-Rare earth elements in Carboniferous karstic bauxites in southwest China[J]. Ore Geology Reviews, 119: 1-13.
- Liu B J. 1980. Sedimentary petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House. 8-166(in Chinese).
- Liu G and Zhou D S. 2007. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment-taking Qianjiang Formation in the Jiangnan basin as an example[J]. Petroleum Geology & Experimental, 29(3): 307-310+314(in Chinese with English abstract).
- Liu L J, Wang D H, Liu X F, Li J K, Dai H Z and Yan W D. 2017. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine[J]. Geology in China, 44(2): 263-278(in Chinese with English abstract).
- Liu L J, Wang D H, Gao J Q, Yu F and Wang W. 2019. Breakthroughs of lithium exploration progress(2017~2018) and its significance to China's strategic key mineral exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1479-1488(in Chinese with English abstract).
- Liu P. 1987. An initial discussion on Guizhou Bauxites[J]. Geology of Guizhou, 4(1): 1-12(in Chinese with English abstract).
- Liu X F, Wang Q S, Chen Y N, Qin D X, et al. 1990. Bauxite mineralogical characteristic and mineralogical law in northern Guizhou, China[M]. Guizhou: Guizhou People's Publishing House. 12-148(in Chinese).
- Liu Y. 1987. Mineralogical characteristics of two types of illites[J]. Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology, (2): 62-67(in Chinese).
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, Wang H N, Chu T Q and Zhang J R. 1984. Geochemistry of element [M]. Beijing: Science Press. 1-330(in Chinese).
- Long K S, Fu Y, Chen R, Ye Y M, Yan S and Chen M Z. 2019. The REE enrichment mechanism of bauxite deposits in the northern Guizhou: A case study of the Xinmin bauxite deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 39(4): 443-454(in Chinese with English abstract).
- Mo G Y, Jin Z G, Gong H Q and Wu Q M. 2013. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Xinmin bauxite deposit in Daozhen County, northern Guizhou Province[J]. Geological Science and Technology Information, 32(1): 40-45(in Chinese with English abstract).
- Qi S J, Xiao K Y, Ding J H, Lou D B and Sun L. 2014. Analysis on the distribution and potential of lithium resources in China[J]. Mineral Deposits, 33(Supp.): 809-810(in Chinese).
- Shen L P, Song Y H, Peng Z R and Guo K Z. 1986. Discovery and preliminary study of Li-chlorite in claystone from a certain location of Henan Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 6(1): 86-91(in Chinese).
- Shi Z S, Chen K Y, Shi J, Liu B J, He H J and Liu G. 2003. Feasibility analysis of determining sedimentary environment by ratio of strontium to barium[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 10(2): 12-16+89-90(in Chinese with English abstract).
- Wang X M, Jiao Y Q, Du Y S, Zhou Q, Cui T, Ji B, Lei Z Y, Weng S F, Jin Z G and Xiong X. 2013. Rare earth element geochemistry of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province[J]. Geological Science and Technology Information, 32(1): 27-33(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Li P G, Qu W J, Lei Z Y and Liao C Y. 2013. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China[J]. Science China: Earth Sciences, 43(1): 44-51(in Chinese).
- Wang D H, Sun Y, Liu X F, Tian S H, Dai J J, Liu L J and Ma S C.

2018. Deep exploration technology and prospecting direction for lithium energy metal[J]. Geological Survey of China, 5(1): 1-9(in Chinese with English abstract).
- Wang F, Liu X C, Deng X Q, Li Y H, Tian J C, Li S X and You J Q. 2017. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 35(6): 1265-1273(in Chinese with English abstract).
- Wang Q S and Yuan C H. 2019. The global supply situation of lithium ore and suggestions on resources security in China[J]. China Mining Magazine, 28(5): 1-6(in Chinese with English abstract).
- Wang T, Zhao X D, Li J M and Lü T. 2014. Distribution characteristics of lithium in Yinkuangyakou bauxite deposit, Chongqing[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 29(4): 541-545(in Chinese with English abstract).
- Wang X, Cheng H G, Zhao J and Cheng F Q. 2018. The effect of sedimentary minerals on the migration of lithium and rubidium in water environment[J]. Environmental Science and Technology, 31(2): 1-4(in Chinese with English abstract).
- Wang X Y, Zhang R Z, Yang S L and Liu B S. 2020. Studying on the process mineralogy and existing state of lithium in bauxite ore from mianchi district, Henan Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 6: 163-170(in Chinese with English abstract).
- Wei H T. 2013. Geological characteristics and metallogenic regulation of bauxite deposit, Wuzhengdao, Guizhou Province(Master's thesis)[D]. Tutor: Shao Y J. Changsha: Central South University. 1-57(in Chinese).
- Wei W and Algeo T J. 2019. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 287: 1-26.
- Wen H J, Luo C G, Du S J, Yu W X, Gu H N, Ling K Y, Cui Y, Li Y and Yang J H. 2020. Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance[J]. Chinese Science Bulletin, 65: 53-59(in Chinese with English abstract).
- Wen J J, Liao T, Lu R and Wang L. 2016. Mineralization of Li, Ti, Zr, Ga, Nb and LREE of bauxite deposits in Songji area of Henan[J]. Mineral Resources and Geology, 30(2): 216-222(in Chinese with English abstract).
- Wu G H, Liu Y P and Zhang Y W. 2006. Geological characters and aluminum ore resources potential in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou[J]. Geology and Prospecting, 42(2): 39-43(in Chinese with English abstract).
- Wu Y Q and Zhao Z Q. 2011. Experimental study on the adsorption of  $\text{Li}^+$  on kaolinite and montmorillonite[J]. Acta Mineralogica Sinica, 31(2): 291-295(in Chinese with English abstract).
- Xu L G, Lehmann B, Zhang X G, Zheng W and Meng Q T. 2014. Trace element distribution in black shales from the Kunyang phosphorite deposit and its geological significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(6): 1817-1827(in Chinese with English abstract).
- Xu Z H, Hu S Y, Wang Z C, Xu A N and Jiang Q C. 2011. Restoration of paleoclimate and its geological significance: As an example from Upper Triassic Xujiache Formation in Sichuan basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 29(2): 235-244(in Chinese with English abstract).
- Yan S. 2020. Enrichment of lithium from Xinmin bauxite in northern Guizhou and its indication of lithium isotope (Master's thesis)[D]. Tutor: Fu Y. Guiyang: Guizhou University. 1-56(in Chinese).
- Yang J H, Luo C G, Du S J, Yu W X, Yang Y and Wen H J. 2020. Discussion on the applicability of paleoenvironmental index for sedimentary rocks with high clay content[J]. Acta Mineralogica Sinica, 40(6): 723-733(in Chinese with English abstract).
- Yao S Q, Pang C J, Wen S N, Liang H, Lu G H, Yi B C, Tan F and Luo Q H. 2020. Li-rich claystone in the Upper Permian Heshan Formation in western Guangxi and its prospecting significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1-12(in Chinese with English abstract).
- Ye L, Pan Z P and Cheng Z T. 2007. The prospects of comprehensive utilization of associated elements in bauxites from Guizhou[J]. Acta Mineralogica Sinica, 27(3/4): 388-392(in Chinese with English abstract).
- Yu F, Wang D H, Yu Y, Liu Z, Gao J Q, Zhong J A and Qin Y. 2019. The distribution and exploration status of domestic and foreign sedimentary-type lithium deposits[J]. Rock and Mineral Analysis, 38(3): 354-364(in Chinese with English abstract).
- Yu W C, Du Y S, Zhou Q, Jin Z G, Wang X M and Cui T. 2014. Palaeoclimate of the early Permian: Evidence from characteristics of bauxite beds in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province[J]. Journal of Palaeogeography, 16(1): 30-40(in Chinese with English abstract).
- Yu W C. 2017. Sedimentological and metallogenic study of bauxite deposits in Guizhou and Guangxi Provinces, south China(Doctoral Thesis)[D]. Tutor: Du Y S. Wuhan: China University of Geosciences. 1-134(in Chinese).
- Yu W C, Algeo T J, Yan J X, Yang J H, Du Y S, Huang X and Weng S F. 2018. Climatic and hydrologic controls on Upper Paleozoic bauxite deposits in South China[J]. Earth-Science Reviews, 189: 1-18.
- Yun M C, Wang F Y, Lin W and Li Y K. 2017. Characteristics of three types of rare earth mineral resources associated with bauxite deposit in the eastern Pinglu, Shanxi[J]. Mineral Exploration, 8(5): 772-781.
- Zhao L, Ward C R, French D, Graham I T, Dai S F, Yang C, Xie P P and Zhang S Y. 2018. Origin of a kaolinite- $\text{NH}_4$ -illite-pyrophyllite-chlorite assemblage in a marine-influenced anthracite and associated strata from the Jincheng coalfield, Qinshui basin, northern China[J]. International Journal of Coal Geology, 185: 61-79.
- Zhao X D, Li J M, Chen L, Chen Y, Jia D L, Li Z H and Lü T. 2013. Analysis on gallium geochemical characteristics and ore-forming environment of bauxite mine in Yinkuangyakou of Chongqing[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 31(6): 1022-1030(in Chinese with English abstract).
- Zhong H R, Sun Y, Yang Y Q, Wang D H, Huang F and Zhao Z. 2019.

Bauxite (aluminum)-type lithium resources and analysis of its development and utilization potential[J]. Mineral Deposits, 38(4): 898-916(in Chinese with English abstract).

Zhu L, Gu H N, Yang Y Q, Wen H J, Wang N and Luo C G. 2020. Research progress of lithium extraction from clay-type lithium ore resources[J]. Light Metal, 12: 8-13(in Chinese).

#### 附中文参考文献

鲍森,韩家家,朱斗圣,谢方旭,林权富,刘刚. 2020. 黔北务正道地区铝土矿稀土元素地球化学特征与富集规律研究[J]. 矿产勘查, 11(5): 936-943.

崔滔. 2013. 黔北地区铝土矿成矿环境分析(博士学位论文)[D]. 导师:焦养泉. 武汉:中国地质大学. 1-107.

崔滔,焦养泉,杜远生,汪小妹,雷志远,翁申富. 2013a. 黔北地区铝土矿矿物学与地球化学特征[J]. 中国有色金属学报, 23(10): 2905-2920.

崔滔,焦养泉,杜远生,余文超,计波,雷志远,翁申富,金中国,和秀林. 2013b. 黔北务正道地区铝土矿形成环境的古盐度识别[J]. 地质科技情报, 32(1): 46-51.

崔滔. 2020. 黔北铝土矿成矿关键控制因素——海平面变化[J]. 中国有色金属学报, 30(6): 1466-1479.

崔焱,罗重光,徐林,张海,邓明国,顾汉念,孟勇,秦朝建,温汉捷. 2018. 黔中九架炉组富锂黏土岩系的风化成因及锂的富集规律[J]. 矿物岩石地球化学通报, 37(4): 696-704.

代龙省. 2015. 贵州道真县新民铝土矿床地质地球化学特征研究(硕士学位论文)[D]. 导师:金中国. 昆明:昆明理工大学. 1-64.

邓国仕,李军敏,杨桂花,赵晓东,陈莉,陈阳,吕涛. 2014. 渝南水江板桥铝土矿区锂的分布规律及其影响因素研究[J]. 中国矿业, 23(3): 72-79.

邓旭升,杜远生,余文超,吴开彬,卢树藩,张晗彬. 2020. “黔中隆起”和贵州晚古生代古地理演化及其对铝土矿的控矿作用[J]. 古地理学报, 22(5): 872-892.

杜远生,周琦,金中国,凌文黎,汪小妹,余文超,崔滔,雷志远,翁申富,吴波,覃永军,曹建州,彭先红,张震,邓虎. 2014. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿成矿模式[J]. 古地理学报, 16(1): 1-8.

杜远生,周琦,金中国,焦养泉等. 2015. 黔北务正道地区二叠系铝土矿沉积地质学[M]. 武汉:中国地质大学出版社. 4-160.

杜远生,余文超. 2020. 沉积型铝土矿的陆表淋滤成矿作用:兼论铝土矿床的成因分类[J]. 古地理学报, 22(5): 812-826.

贵州省地质调查院. 2017. 贵州省区域地质志[M]. 北京:地质出版社. 93-1024.

韩英,邹林,王京彬,祝新友,金中国,路轩轩,郭娇. 2016. 贵州省务正道地区铝土矿地球化学特征及意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 35(4): 653-662+691.

黄兴,张雄华,杜远生,郗文昆,杨兵,段先锋. 2013. 黔北务正道地区及邻区石炭纪—二叠纪之交海平面变化对铝土矿的控制[J]. 地质科技情报, 32(1): 80-86.

黄智龙,金中国,向贤礼,谷静,武国辉,陈兴龙,苏之良,赵远由,叶霖,邹林. 2014. 黔北务正道铝土矿成矿理论及预测[M]. 北京:科学出

版社. 21-489.

姜在兴. 2003. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社. 1-528.

金中国,黄智龙,刘玲,陈兴龙,鲍森. 2013. 黔北务正道地区铝土矿成矿规律研究[M]. 北京:地质出版社. 7-127.

金中国,周家喜,黄智龙. 2015. 黔北务-正-道地区典型铝土矿床伴生有益元素锂、镓和钽分布规律[J]. 中国地质, 42(6): 1910-1918.

金中国,刘辰生,邹林,郑明泓,张力,韩英. 2018. 贵州务-正-道地区二叠纪铝土矿沉积环境地球化学证据[J]. 地质学报, 92(4): 817-827.

金中国,刘玲,黄智龙,刘辰生,郑明泓,谷静,邹林,王林. 2019. 贵州务-正-道地区铝土矿含矿岩系中三稀元素赋存状态、富集机理及资源潜力[J]. 地质学报, 93(11): 2847-2861.

康微. 2013. 河南宝丰铝土矿田地质特征与成矿环境(硕士学位论文)[D]. 导师:王庆飞. 北京:中国地质大学. 34-60.

廖士范,梁同荣. 1991. 中国铝土矿地质学[M]. 贵州:贵州科技出版社. 1-250.

刘宝珺. 1980. 沉积岩石学[M]. 北京:地质出版社. 8-166.

刘刚,周东升. 2007. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用——以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质, 29(3): 307-310+314.

刘丽君,王登红,刘喜方,李建康,代鸿章,闫卫东. 2017. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质, 44(2): 263-278.

刘丽君,王登红,高娟琴,于飒,王伟. 2019. 国外锂矿找矿的新突破(2017~2018年)及对我国关键矿产勘查的启示[J]. 地质学报, 93(6): 1479-1488.

刘平. 1987. 初论贵州之铝土矿[J]. 贵州地质, 4(1): 1-12.

刘巽锋,王庆生,陈有能,秦典燮等. 1990. 黔北铝土矿成矿地质特征及成矿规律[M]. 贵州:贵州人民出版社. 12-148.

刘羽. 1987. 两类伊利石的矿物学特征[J]. 武汉化工学院学报: (2): 62-67.

刘英俊,槽励明,李兆麟,王鹤年,储同庆,张景荣. 1984. 元素地球化学[M]. 北京:科学出版社. 1-330.

龙克树,付勇,陈蕤,叶远谋,严爽,陈满志. 2019. 黔北铝土矿稀土元素富集机制——以新民铝土矿为例[J]. 矿物学报, 39(4): 443-454.

莫光员,金中国,龚和强,吴启美. 2013. 黔北道真新民铝土矿矿床地质特征及控矿因素探讨[J]. 地质科技情报, 32(1): 40-45.

齐帅军,肖克炎,丁建华,娄德波,孙莉. 2014. 中国锂矿资源分布和潜力分析[J]. 矿床地质, 33(S1): 809-810.

沈丽璞,宋云华,彭昭瑞,郭可战. 1986. 河南某地黏土矿中锂绿泥石的发现及初步研究[J]. 矿物学报, 6(1): 86-91.

史忠生,陈开远,史军,柳保军,何胡军,刘刚. 2003. 运用锶钡比判定沉积环境的可行性分析[J]. 断块油气田, 10(2): 12-16+89-90.

汪小妹,焦养泉,杜远生,周琦,崔滔,计波,雷志远,翁申富,金中国,熊星. 2013. 黔北务正道地区铝土矿稀土元素地球化学特征[J]. 地质科技情报, 32(1): 27-33.

王登红,李沛刚,屈文俊,雷志远,廖友常. 2013. 贵州大竹园铝土矿中钨和锂的发现与综合评价[J]. 中国科学:地球科学, 43(1): 44-51.

王登红,孙艳,刘喜方,田世洪,代晶晶,刘丽君,马圣钊. 2018. 锂能源金属矿产深部探测技术与找矿方向[J]. 中国地质调查, 5(1): 1-9.

- 王峰,刘玄春,邓秀芹,李元昊,田景春,李士祥,尤靖茜. 2017. 鄂尔多斯盆地地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 沉积学报, 35(6): 1265-1273.
- 王秋舒,元春华. 2019. 全球锂矿供应形势及我国资源安全保障建议[J]. 中国矿业, 28(5): 1-6.
- 王涛,赵晓东,李军敏,吕涛. 2014. 重庆银矿垭口铝土矿锂的分布特征[J]. 地质找矿论丛, 29(4): 541-545.
- 王鑫,成怀刚,赵静,程芳琴. 2018. 水体中锂、铷在部分沉积矿物作用下的迁移规律研究[J]. 环境科技, 31(2): 1-4.
- 王新彦,张荣臻,杨松林,刘百顺. 2020. 河南渑池地区铝土矿工艺矿物学及锂的赋存状态研究[J]. 矿产综合利用, 6: 163-170.
- 隗含涛. 2013. 贵州务正道地区铝土矿矿床地质特征及成矿规律研究(硕士论文)[D]. 导师:邵拥军. 长沙:中南大学. 1-57.
- 温汉捷,罗重光,杜胜江,于文修,顾汉念,凌坤跃,崔焱,李阳,杨季华. 2020. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义[J]. 科学通报, 65(1): 53-59.
- 温静静,梁涛,卢仁等. 2016. 河南省嵩箕地区铝土矿 Li、Ti、Zr、Ga、Nb 和 LREE 的矿化分析[J]. 矿产与地质, 30(2): 216-222.
- 武国辉,刘幼平,张应文. 2006. 黔北务-正-道地区铝土矿地质特征及资源潜力分析[J]. 地质与勘探, 42(2): 39-43.
- 吴雅琴,赵志琦. 2011. 高岭石和蒙脱石吸附 Li<sup>+</sup> 的实验研究[J]. 矿物学报, 31(2): 291-295.
- 徐林刚, Lehmann B, 张锡贵, 郑伟, 孟庆田. 2014. 云南昆阳磷矿黑色页岩微量元素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(6): 1817-1827.
- 徐兆辉,胡素云,汪泽成,徐安娜,江青春. 2011. 古气候恢复及其对沉积的控制作用——以四川盆地上三叠统须家河组为例[J]. 沉积学报, 29(2): 235-244.
- 严爽. 2020. 黔北新民铝土矿锂的富集规律及其锂同位素指示意义(硕士论文)[D]. 导师:付勇. 贵阳:贵州大学. 1-56.
- 杨季华,罗重光,杜胜江,于文修,杨洋,温汉捷. 2020. 高黏土含量沉积岩古环境指标适用性讨论[J]. 矿物学报, 40(6): 723-733.
- 姚双秋,庞崇进,温淑女,梁航,卢光辉,尹本纯,覃丰,罗桥花. 2020. 桂西上二叠统合山组富锂黏土岩的发现及意义[J]. 大地构造与成矿学, 1-12.
- 叶霖,潘自平,程曾涛. 2007. 贵州铝土矿中伴生元素综合利用前景[J]. 矿物学报, 24(3/4): 388-392.
- 于泓,王登红,于扬,刘铸,高娟琴,仲佳爱,秦燕. 2019. 国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状[J]. 岩矿测试, 38(3): 354-364.
- 余文超,杜远生,周琦,金中国,汪小妹,崔滔. 2014. 黔北务正道地区铝土矿层特征及其反映的早二叠世古气候[J]. 古地理学报, 16(1): 30-40.
- 余文超. 2017. 华南黔桂地区铝土矿沉积-成矿作用[D]. 导师:杜远生. 武汉:中国地质大学. 1-134.
- 俞孟超,王凤宇,林伟,李英奎. 2017. 山西平陆县东部与铝土矿共伴生的“三稀”矿产特征[J]. 矿产勘查, 8(5): 772-781.
- 赵晓东,李军敏,陈莉,陈阳,贾德龙,李再会,吕涛. 2013. 重庆银矿垭口铝土矿床镓地球化学特征及成矿环境研究[J]. 沉积学报, 31(6): 1022-1030.
- 钟海仁,孙艳,杨岳清,王登红,黄凡,赵芝. 2019. 铝土矿(岩)型锂资源及其开发利用潜力[J]. 矿床地质, 38(4): 898-916.
- 朱丽,顾汉念,杨永琼,温汉捷,王宁,罗重光. 2020. 黏土型锂矿资源提锂工艺研究进展[J]. 轻金属, 12: 8-13.